

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Petar Ljubičić

Zagreb, 2008.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Dr. sc. Nenad Dujmović

Petar Ljubičić

Zagreb, 2008.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne radove
Studij strojarstva
Konstrukcijski smjer



Zagreb, 10. 02. 2008.

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI RAD

Student: **Petar Ljubičić**

Mat. br.: 0035151387

Naslov: **ODREĐIVANJE NAJVEĆIH MOGUĆIH VANJSKIH IZMJERA,
KARAKTERISTIKA GIBANJA I UNUTRAŠNJE ARHITEKTURE
PUTNIČKOG VAGONA ZA IC (INTER-CITY) PROMET**

Opis zadatka:

1) U radu je potrebno:

1. Odrediti najveće moguće izmjere putničkog vagona s dva okretna postolja i četiri osovine za IC putnički promet vezano za kinematički UIC-GB profil.
2. Provjeriti geometriju kotač/tračnica za prolaz kroz najmanji luk kolosijeka i odrediti najveću brzinu, proračunati sile na kolosijek te provjeriti sigurnost od iskliznuća i prevrtanja.
3. Razraditi unutrašnju arhitekturu vagona za komfor prvog razreda kao i glavni sastavni crtež vagona (tlocrt i nacrt)

2) Zadani su slijedeći parametri:

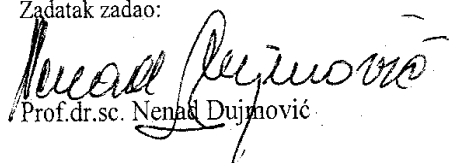
1. Geometrija vozila prema kinematičkom profilu UIC-GB
2. Najmanji luk kolosijeka na otvorenoj pruzi $R = 300 \text{ m}$
3. Najveća brzina na ravnoj horizontalnoj pruzi 200 km/h
4. Najveće dozvoljeno neponišteno bočno ubrzanje 1 m/s^2
5. Razmak osi kolosijeka dvokolosječne pruge 4.2 m

Podloga: Putnički vagon Gredelj

Zadatak zadan:

10. listopada 2007.

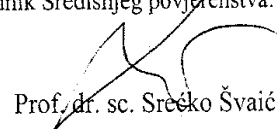
Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Nenad Dujmović

Rok predaje rada:

Listopad 2008.

Predsjednik Središnjeg povjerenstva:


Prof. dr. sc. Srećko Švaić

Referada za diplomске i završne ispite

Obrazac DS - 3/IDS-3

Završni rad izradio sam samostalno, služeći se stečenim znanjem tijekom studija i navedenom literaturom

Zahvaljujem mentoru dr. sc. Nenadu Dujmoviću na brojnim stručnim savjetima, strpljenju i potpori tijekom izrade ovog rada

Gospodinu Stipi Bunčiću iz Gredelja zahvaljujem na informacijama i ustupljenim crtežima što je doprinijelo kvaliteti ovog rada

Posebno zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumjevanju i potpori

Sažetak

Svrha ovog rada je projektiranje, proračun putničkog vagona te razrada unutrašnje arhitekture za komfor prvog razreda. Kao oslonac za izradu ovog rada korišteni su podaci za putnički vagon Gredelj.

Pritom je utvrđeno ispunjava li vagon sve potrebne zahtjeve prema zadanim parametrima, te utvrđenim dogovorima i normama.

Rad je podjeljen u nekoliko cijelina prema zadatku te se u njemu nalaze potrebni crteži, slike i dijagrami. Za izradu crteža korišten je program AutoCAD.

Uvodni dio sadržava objašnjenja vezana uz određivanje bitnih karakteristika željezničkih vozila kao i podijelu željezničkih vozila te općeniti prikaz značajki željeznica i njihove važnosti u modernom prometu.

U prvom dijelu usklađuju se vanjske dopuštene izmjera vagona, prema zakonskim normama (UIC-GB). Zbog toga treba izmjere i karakteristike vozila uskladiti s propisanim ovojnicama statičkog i kinematičkog profila vozila.

U drugom dijelu obrazloženo je vijuganje vozila, djelovanje sila između kotača i tračnice pri prolasku kroz najmanji luk kolosijeka, kao i proračun sila na kolosijek. Određena je maksimalna brzina kojom vagon može proći kroz luk, te provjerena sigurnost od iskliznuća i prevrtanja pri prolasku kroz najmanji luk kolosijeka.

U prilogu se nalazi nacrt i tlocrt lokomotive iz kojih se može vidjeti raspored te unutrašnja arhitektura vagona za komfor prvog razreda.

Sadržaj

SAŽETAK	3
POPIS SLIKA I TABLICA.....	9
POPIS OZNAKA	10
1. UVOD	11
1.1. ŽELJEZNICA	11
1.2. ŽELJEZNIČKA PRUGA	11
1.3. NAJVEĆA DOPUŠTENA BRZINA	12
1.4. MJERODAVNI NAGIB PRUGE	12
1.5. ŽELJEZNIČKA VOZILA	13
1.6. PROFILI ŽELJEZNIČKOG VOZILA.....	10
2. VANJSKE IZMJERE VAGONA.....	12
2.1. ODNOS VANJSKIH IZMJERA LOKOMOTIVE I OVOJNICE KINEMATIČKOG PROFILA.....	12
3. GEOMETRIJA KOTAČC/TRAČNICA,PRORAČUN SILA NA KOLOSIJEK I PROVJERA SIGURNOSTI OD ISKLIZNUĆA	13
3.1. MEHANIKA VOĐENJA VOZILA KOLOSIJEKOM	13
3.2. NAJVEĆA BRZINA U LUKU	16
3.3. SILE NA KOLOSIJEK	17
3.4. PROVJERA SIGURNOSTI OD ISKLIZNUĆA	19
8. ZAKLJUČAK.....	20
9. LITERATURA	21
PRILOG: NACRT I TLOCRT PUTNIČKOG VAGONA ZA IC PROMET	

Popis slika i tablica

Popis slika:

- Slika 1. Lijevo: električna lokomotiva serije HŽ 1141, desno: elektromotorni vlak serije HŽ 6111*
- Slika 2. Putnički vagon prvog razreda Gredelj At*
- Slika 3. Unutrašnjost putničkog vagona prvog razreda Gredelj At*
- Slika 4. Glavne izmjere ovojnice statičkog profila (ST) i kinematičkog profila (GB, GC) željezničkih vozila prema propisu UIC*
- Slika 5. Glavne izmjere slobodnog profila na prugama Hrvatskih željeznica*
- Slika 6. Vanjske izmjere vagona u odnosu na ovojnicu kinematičkog profila*
- Slika 7. Vijugavo kotrljanje osovinskog sklopa po tračnicama u ravni xy. 1 osovinski sklop, 2 tračnice, 3 os kolosijeka, 4 krivulja putovanja središta osovinskog sklopa*
- Slika 8. Osovinski sklop na tračnicama. D promjer kotača, γ kut koničnosti kotrljajućih ploha kotača, GRT gornji rub tračnica*
- Slika 9. Nalijetanje vijenca kotača na bok glave tračnice (a) i paralelogram djelujućih sila u početku podizanja kotača (b)*
- Slika 10. Skica grafičkog određivanja sile skretanja prema Heumannu za brzinu lokomotive od 65 km/h u zavoju $R = 300$ m*

Popis tablica:

Popis oznaka

a_{nep}	[m/s ²]	najveće neponišteno bočno ubrzanje
b	[-]	faktor za 4-osovinska postolja
F_C	[N]	centripetalna sila
F_H	[N]	sila skretanja prema Heumannu
F_k	[N]	sila na kolosijek
F_P	[N]	najveća dopuštena bočna sila na kolosijek prema Prud'hommeu
F_Y	[N]	sila vođenja
g	[m/s ²]	gravitacijsko ubrzanje
k	[-]	broj pogonskih osovina
l_{RO}	[mm]	razmak osovina u okretnom postolju
m_v	[kg]	masa vagona
N_B	[N]	normalna komponenta opterećenja u točki B
Q_{dop}	[N]	dpušteno osovinsko opterećenje
Q_k	[N]	opterećenje kotača
Q_o	[N]	osovinsko opterećenje
R	[m]	radijus luka kolosijeka
β	[°]	kut nagiba vijenca kotača
v	[m/s]	brzina
$v_{R\text{max}}$	[m/s]	najveća brzina u najmanjem luku kolosijeka
μ_s	[-]	koeficijent trenja za suhe tračnice
μ_s	[-]	koeficijent trenja između vijenca kotača i boka glave tračnice
ρ	[°]	kut trenja

1. Uvod

1.1. Željeznica

Prisilno vođenje vozila kolosijekom mehaničkim dodiranjem kotača i tračnica glavna je osobina željeznice. Na taj način se ostvaruje nošenje, vođenje, pogon i kočenje vozila. Zbog relativno malog trenja između kotača i tračnica željeznica je vrlo osjetljiva u pogledu većih uspona. Također je velika i kinetička energija željezničkih vlakova zbog njihove velike mase i velikih brzina. Posljedica male sile trenja između kotača i tračnica, koja je raspoloživa za poništavanje kinetičke energije i zaustavljanje, je dugi zaustavni put od više stotina, pa do nekoliko tisuća metara, što ovisi o masi i brzini vlaka. Dugi zaustavni put ne omogućuje vožnju na vid zbog čega su željezničke pruge opremljene signalno-sigurnosnim i telekomunikacijskim uređajima koji služe za automatizaciju i sigurnost željezničkog prometa. Vrlo mali otpori kotrljanja javljaju se između kotača i tračnica, približno deset puta manji od otpora cestovnih vozila, što omogućuje vožnju vlakova takvih masa i duljina kakve ni za jedno kopneno prijevozno sredstvo nije moguće. Danas željeznice, pored naglog razvoja cestovnog i zračnog prometa, imaju niz prednosti: društvena (gospodarska) rentabilnost (mali otpori, dugi vlakovi), manja specifična potrošnja energije (3 puta manja od potrošnje automobila, 5 puta manja od potrošnje zrakoplova po putničkom kilometru, 3 puta manja od potrošnje kamiona po neto tonskom kilometru), relativno malen potreban prostor (3 puta manji od autoceste jednakog prometnoga kapaciteta), najmanje štetno djelovanje na okoliš (sve je veći udio električne vuče, pa je sve manje ispušnih plinova i buke), veliki stupanj sigurnosti u prijevozu putnika i robe, mogućnost velikih prosječnih brzina te pouzdanost i pri vremenskim nepogodama (snijeg, magla).

1.2. Željeznička pruga

Željezničku prugu čine jedan ili više kolosijeka po kojima se kreću željeznička vozila. Kolosijek sačinjavaju tračnice i pragovi koji ih povezuju.

Vrsta pruge označava opće karakteristike pruge koje obuhvaćaju širinu i broj kolosijeka te kategoriju pruge.

Širina kolosijeka je najmanji razmak unutrašnjih rubova tračnica, i to mjereno na mjestu koje se nalazi 14 mm ispod gornjeg ruba glave tračnice. Normalna širina kolosijeka je 1435 mm. Željeznice s većim razmakom tračnica od 1435 mm nazivaju se *širokotračne*, a one s manjim razmakom od 1435 mm *uskotračne*.

Broj kolosijeka ovisi o potrebnoj propusnoj i prijevoznoj moći pruge. *Propusna moć* iskazuje se brojem vlakova koji mogu proći prugom u oba smjera u određenom vremenu, a *prijevozna moć* je ukupna bruto masa koja se može prevesti prugom u oba smjera u određenom vremenu.

Kategorizacija pruge odvija se u skladu s propisima UIC-700, koji su obvezujući za sve članice Međunarodne željezničke unije (Union Internationale des Chemin de Fer, UIC). Za svaku razvrstanu prugu propisuje se dopušteno osovinsko opterećenje prema kojem se ugrađuju odgovarajuće pružne građevine i gornji ustroj.

1.3. Najveća dopuštena brzina

Vlakovi velikih brzina su željeznička vozila koja se gibaju tračnicama brzinom većom od 200 km/h. Ta brzina je orijentacijska iskustvena granica na osnovu koje se postavljaju razmišljanja u pogledu tehničkih i tehnoloških pitanja željezničkih vozila, cijelokupne infrastrukture, sigurnosti, logistike i organizacije željezničkog prometa. Najveća dopuštena brzina vlaka ovisi o tehničkim karakteristikama prometnice te o tehničkim i konstrukcijskim svojstvima vozila. Ona predstavlja osnovni element za proračun geometrije kolosijeka i njen izbor ima veliki utjecaj na troškove građenja, pogona i održavanje pruge.

Osim najveće dopuštene brzine, u željezničkom prometu poznate su:

- *računska brzina*, koja služi za proračun geometrijskih elemenata trase i drugih elemenata potrebnih za oblikovanje i opremu pruge, tako da se omogući vožnja vlakova najvećom dopuštenom brzinom
- *tehnička brzina*, omjer puta i vremena vožnje, u koji su uračunati i gubici pri ubrzanju i usporanju vlaka, ali ne i zadržavanje u postajama
- *komercijalna brzina*, omjer duljine dionice pruge i ukupnog vremena putovanja po njoj.

Na prugama koje služe samo teretnom prometu moguće su samo manje brzine. U gradskom i prigradskom prometu grade se pruge samo za putnički promet. Pritom su brzine ograničene na 80 do 120 km/h zbog čestog zaustavljanja na postajama. Najbrojnije su pruge za mješoviti daljinski promet (putnički i teretni vlakovi), s brzinama 80 do 160 km/h. Na europskim magistralnim pravcima najveće su dopuštene brzine do 200 km/h, iznimno do 250 km/h, a na novim prugama koje služe samo putničkom prometu brzine vlakova dosežu 250 do 300 km/h, pa i više (npr. u Japanu i Francuskoj).

Brzine vlakova na magistralnim pravcima svrstane su u tri kategorije: brzine do 160 km/h moguće su na rekonstruiranim i osuvremenjenim postojećim prugama, brzine od 160 do 200 km/h moguće su u povoljnim okolnostima (na ravničarskom terenu) na rekonstruiranim i osuvremenjenim postojećim prugama te na novoizgrađenim prugama, a brzine od 200 do 300 km/h, pa i više, moguće su samo na potpuno novim prugama.

Najveća dopuštena brzina osnovni je element u proračunu ostalih geometrijskih elemenata trase, polumjera horizontalnog i vertikalnog luka, nadvišenja i međupravaca između lukova.

1.4. Mjerodavni nagib pruge

Pored najveće dopuštene brzine, mjerodavni nagib pruge je drugi osnovni element koji ima najveći utjecaj na kretanje vlaka. To je zbroj otpora koji se pojavljuju zbog uzdužnog nagiba pruge i zbog lukova.

Uzdužni prosječni nagib pruge omjer je visinske razlike i duljine pruge. Otpor kretanju vlaka, koji nastaje zbog uspona pruge, oduzima se od vučne sile lokomotive, dok zbog pada pruge djeluje kao dodatna ubrzavajuća sila u smjeru kretanja vlaka i pribraja se vučnoj sili lokomotive. Stoga je nagib pruge u usponu mjerodavan za određivanje vučne sile, a nagib pruge u padu za određivanje sile kočenja. O nagibu ovise i glavne karakteristike pruge: duljina pruge, troškovi građenja, pogona i održavanja te propusna i prijevozna moć pruge.

Najveći dopušteni mjerodavni nagib, na prugama s putničkim prometom, prema novom Pravilniku Hrvatskih željeznica, iznosi 35 ‰ (prije 25 ‰). Općenito se smatra da najveći mjerodavni nagib na magistralnim prugama mješovitog prometa ne bi trebao biti veći od 18 ‰. Takav nagib još omogućuje ponovno pokretanje vlaka nakon zaustavljanja uz najveće

iskorištenje snage lokomotive, dok primjena većeg nagiba zahtijeva upotrebe dvostruke vuče u teretnom prometu. Na prugama mješovitog prometa, gdje putnički vlakovi voze velikim brzinama (160 do 200 km/h, pa i 250 km/h), preporučuje se mjerodavni nagib do 12,5 ‰.

1.5. Željeznička vozila

Željeznička vozila namjenjena su prijevozu putnika, tereta ili za potrebe željeznice. Ova vrsta vozila kreće se tračnicama po točno predviđenim trasama. Prema osnovnoj podjeli željeznička vozila dijelimo na:

- pogonska vozila – vozila s vlastitim pogonom (lokomotive, motorni vlakovi)
- vučena vozila – vozila bez vlastitog pogona (vagoni – putnički, teretni, specijalni)
- vozila za posebne namjene – vozila s vlastitim pogonom ili vučena drugim vozilom

Željeznička pogonska vozila imaju pogonski agregat za vlastito kretanje i za vuču vagona i ostalih tračničkih vozila bez pogona. Pri tome se potrebna vučna sila ostvaruje pretvorbom električne ili toplinske energije u mehanički rad.

Vučna vozila dijelimo na:

- lokomotive
- motorne vlakove



Slika 1. Lijevo: električna lokomotiva serije HŽ 1141, desno: elektromotorni vlak serije HŽ 6111

Lokomotive služe za vuču putničkih, teretnih i specijalnih vagona. One se sastoje od pogonskog uređaja i upravljačkog dijela te nemaju prostor za putnike ili teret.

Motorni vlakovi su posebna vrsta vučnih vozila koja se sastoje od jedne ili više motornih jedinica između kojih se nalaze putnički vagoni. Koriste se isključivo za prijevoz putnika.

Lokomotive je moguće podijeliti na više načina, pri čemu treba spomenuti da ne postoji neka općenita podjela.

Vučena vozila- vagon

Vagon je željezničko vučeno vozilo bez vlastitog pogona, namijenjeno prijevozu putnika i roba (tereta), a vuku ih lokomotive (vučna vozila).

Prema osnovnoj podijeli vagone dijelimo na:

- putničke vagone (namijenjeni prijevozu putnika)
- teretne vagone (namijenjeni prijevozu tereta)
- vagoni za posebne namijene
- vagoni za potrebe željeznice (npr. izgradnja, ispitivanje pruga)



Slika 2. Putnički vagon prvog razreda Gredelj At

Putnički vagon

Putnički vagon je željezničko vučeno vozilo namijenjeno isključivo prijevozu putnika i davanju usluga putnicima od strane prijevoznika.

Osnovne karakteristike putničkih vagona su: osovinsko opterećenje do 160 kN, sposobnost vožnje velikim brzinama (do 200 km/h i više), kočnica režimi P (putnički režim) i R (brzi režim), mogućnost prelaska iz vagona u vagon tijekom vožnje te velika mirnoća vožnje.

Prema osnovnoj podijeli u putničke vagone spadaju:

- vagoni sa sjedalima
- vagoni sa ležajevima (krevetima)
- vagoni za spavanje
- vagoni restorani
- vagoni za prijevoz pošte
- vagoni saloni
- vagoni za prtljagu putnika

Prema razredima razlikujemo:

- vagone prvog razreda
- vagone drugog razreda
- vagoni za spavanje

Putnički vagoni mogu biti izvedeni sa odjeljcima i hodnikom s jedne strane, sa odjeljcima i hodnikom u sredini i bez odjeljaka.



Slika 3. Unutrašnjost putničkog vagona prvog razreda Gredelj At

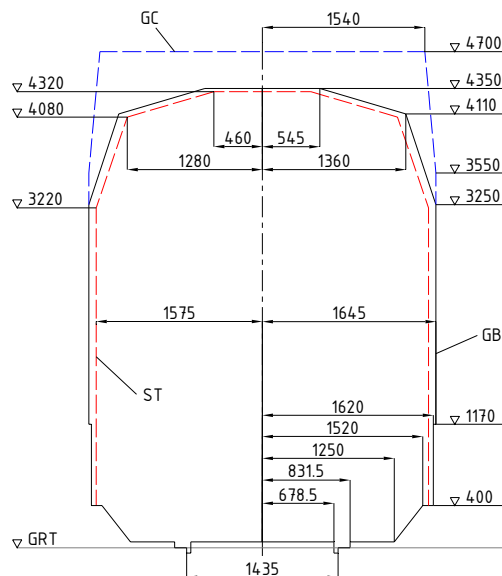
1.6. Profili željezničkog vozila

Svakog trenutka položaj željezničkih vozila, koja se koriste na međunarodnim željezničkim prugama, mora biti takav da ona mogu prolaziti kolosijekom bez opasnosti od bilo kakvog dodira s vozilima na susjednom kolosijeku ili s čvrstim objektima uz prugu. Zbog toga se izmjere i karakteristike vozila moraju uskladiti s propisanim ovojnica statičkog i kinematičkog profila vozila. Za sve propise, norme i dogovore vezane uz željeznice nadležna je Međunarodna željeznička unija (UIC) smještena u Parizu.

Statički profil vozila odnosi se na vozilo u stanju mirovanja. To je kontura poprečnog presjeka vozila koje miruje pri čemu uzimamo u obzir i teret na otvorenom vagonu. Vozilo mora biti tako dimenzionirano da ne prelazi propisanu ovojnicu statičkog profila (linija ST, slika 3).

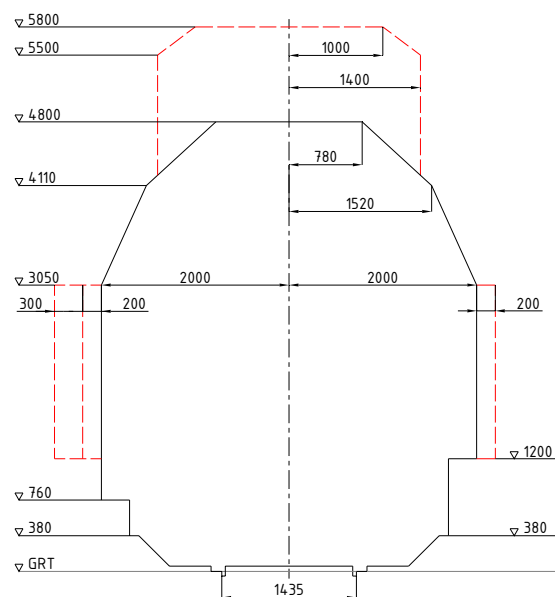
Kinematički profil vozila odnosi se na vozilo u pokretu. To je kontura u ravnini okomitoj na os kolosijeka koju opisuju rubovi vozila u pokretu prilikom njegovog naginjanja u poprečnom smjeru. Izmjere i karakteristike vozila moraju biti takve da vozilo niti u jednom trenutku ne prijeđe propisanu ovojnicu kinematičkog profila (linija GB, slika 3).

Izmjere ovojnice kinematičkog profila mogu se mijenjati u skladu s razvojem željezničkog prometa, npr. uvođenjem dvokatnih vagona, kontejnerskog prijevoza ili prijevoza cestovnih vozila (linija GC, slika 3).



Slika 4. Glavne izmjere ovojnice statičkog profila (ST) i kinematičkog profila (GB, GC) željezničkih vozila prema propisu UIC

Također treba spomenuti profil koji se odnosi na prostor uz sami kolosijek. Taj profil nazivamo *slobodni (svijetli) profil pruge* (slika 4). To je ovojnica u ravnini poprečnoj na os kolosijeka, u koju ne smiju ući objekti i postrojenja uz prugu (uređaji električne mreže, signalni uređaji, otvori tunela, konstrukcijski dijelovi mostova i vijadukata).



Slika 5. Glavne izmjere slobodnog profila na prugama Hrvatskih željeznica

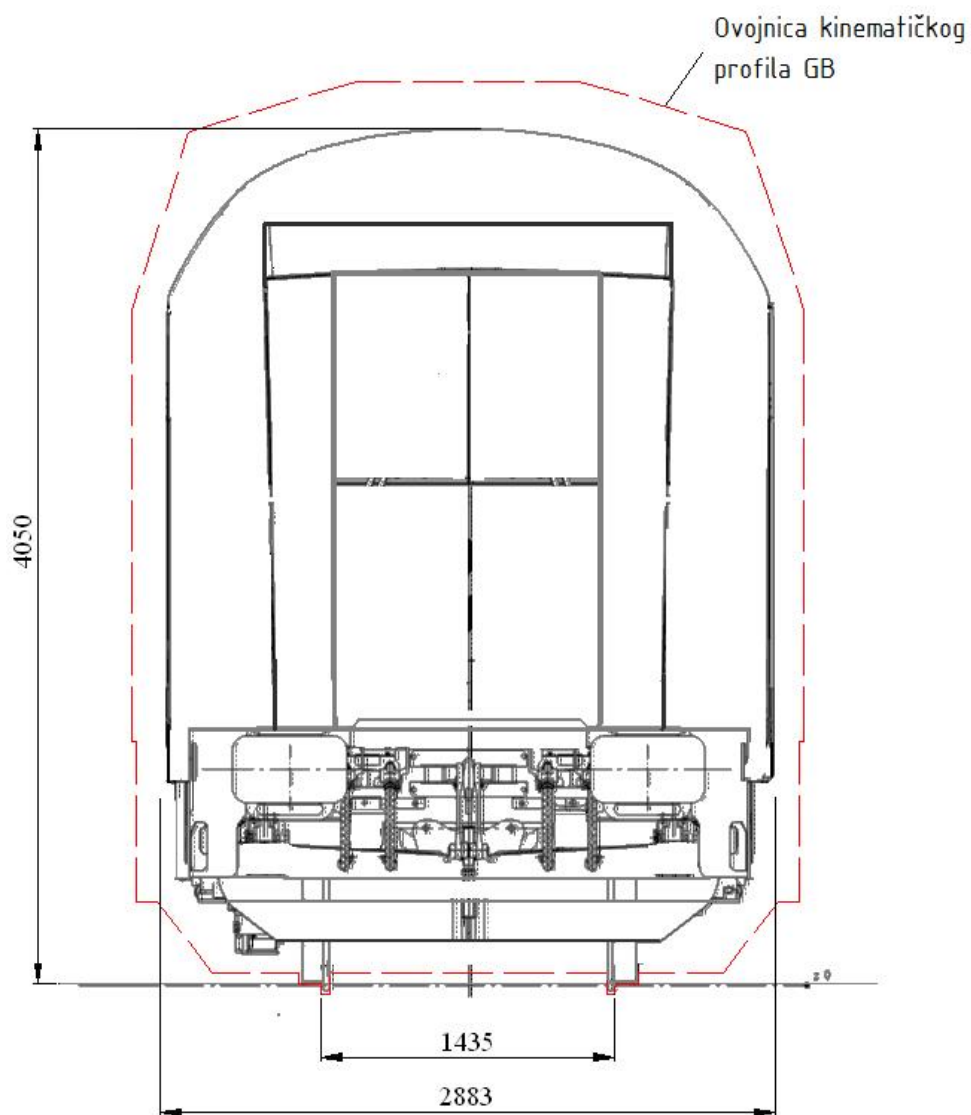
Postoji još i rezervni prostor između kinematičkog profila vozila i slobodnog profila pruge u slučaju mogućih pomaka vozila u najnepovoljnijim uvjetima (loše stanje kolosijeka, jake oscilacije vozila, istrošenost vozila i tračnica).

2. Vanjske izmjere vagona

2.1. Odnos vanjskih izmjera vagona i ovojnice kinematičkog profila

Dimenzije vagona:

- dužina: 24500 mm
- širina: 2883 mm
- visina: 4050 mm



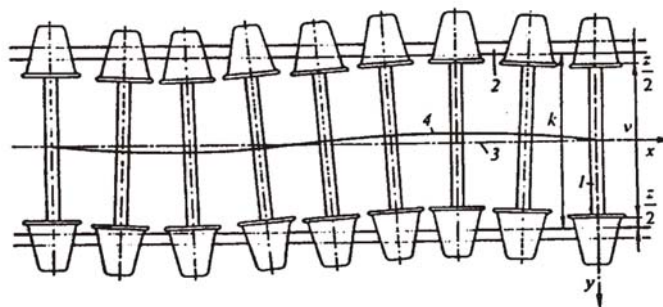
Slika 6. Vanjske izmjere vagona u odnosu na ovojnicu kinematičkog profila

Iz slike je vidljivo da vagon niti jednim dijelom svoje konstrukcije ne prelazi ovojnicu kinematičkog profila što znači da u potpunosti zadovoljava postojeće norme i propise.

3. Geometrija kotač/tračnica, proračun sila na kolosijek i provjera sigurnosti od iskliznuća

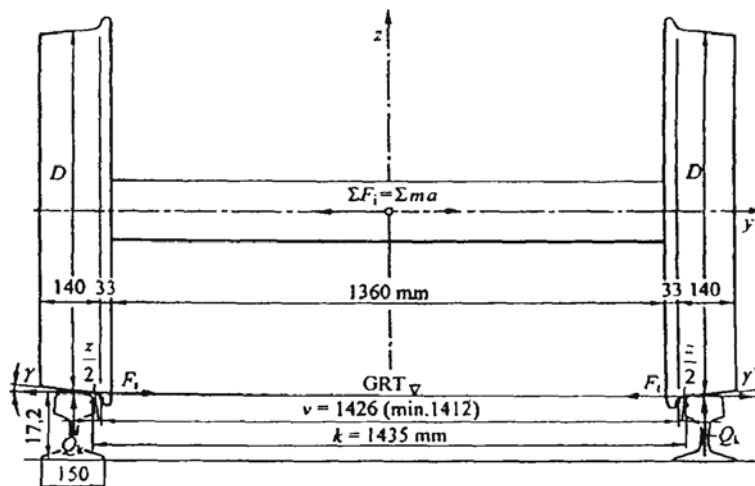
3.1. Mehanika vođenja vozila kolosijekom

Sile na kolosijek od vozila u pokretu i mogućnost njegova iskliznuća posljedice su mehaničkog dodira kotača osovinskog sklopa i tračnica. Pri kotrljanju osovinskog sklopa javljaju se inercijske sile, koje nastoje pomaknuti osovinski sklop u smjeru poprečne osi y , no kojima se opiru sile trenja zbog bočnog klizanja po dodirnim ploham kotača i tračnica. Tako dugo dok se inercijske sile mogu uravnotežiti silama trenja vozilo će vijugati malim amplitudama s obzirom na os kolosijeka u smjeru osi y , a konične kotrljajuće plohe kotača služiti će kao automatska centrirajuća komponenta za zakretanje osovinskog sklopa i njegovo vraćanje u smjer osi kolosijeka (slika 10).



Slika 7. Vijugavo kotrljanje osovinskog sklopa po tračnicama u ravnini xy . 1 osovinski sklop, 2 tračnice, 3 os kolosijeka, 4 krivulja putovanja središta osovinskog sklopa

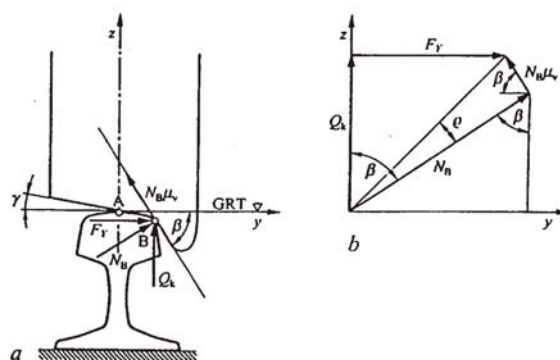
Za opisano kontrolirano vijuganje osovinskog sklopa na raspolaganju je u poprečnom smjeru y prostor između vijenca kotača i boka glave tračnice koji se naziva zazor z (slika 11). On je jednak razlici širine kolosijeka k i razmaka v vijenaca kotača osovinskog sklopa ($z = k - v$). S novougrađenim osovinskim sklopom zazor iznosi oko 10 mm, a s istrošenim i veći od 20 mm. Prema tome, osovinski se sklop pri uravnoteženom vijuganju u zazoru bočno pomiče amplitudama od 3 do 5 mm i u načelu vijenac kotača ne dodiruje bok glave tračnica.



Slika 8. Osovinski sklop na tračnicama. D promjer kotača, γ kut koničnosti kotrljajućih ploha kotača, GRT gornji rub tračnica

Uvjeti se bitno mijenjaju kada inercijske sile prerastu sile trenja poprečnog klizanja kotača po tračnicama, što može nastati u vožnji kroz zavoj, pri bočnim udarima vjetra, neravnomjernosti kolosijeka, neuravnoteženosti vozila itd. U tom trenutku amplitude vijuganja osovinskog sklopa u poprečnom smjeru postaju veće od zazora, pa vijenac kotača nalijeće na bok tračnice, osovinski sklop i cijelo vozilo se zakreću i vraćaju u smjer osi kolosijeka. Vijenac kotača sigurnosna je mjera od izlijetanja osovinskog sklopa i cijelog vozila s tračnica pri prevelikim brzinama u poprečnom smjeru.

Dodir ili čak udarac vijenca kotača o bok glave tračnice još ne znači i stanje pred iskliznuće, već u prvom redu nemirnu i neudobnu vožnju za putnike, prekomjerno trošenje kotača i tračnica te oštećenje kolosijeka. Stvarno stanje koje prethodi iskliznuću (slika 12) definira se kao penjanje vijenca kotača po boku glave tračnice, a nastaje u trenutku kada se zbog bočnih sila kotrljajuća ploha kotača potpuno rastereti (točka A), a cijelo opterećenje od kotača se prenosi na tračnicu na dodirnom mjestu vijenca s bokom tračnice (točka B).



Slika 9. Nalijetanje vijenca kotača na bok glave tračnice (a) i paralelogram djelujućih sila u početku podizanja kotača (b)

Paralelogram sila prikazuje ravnotežu sila u smjeru osi z i y , pa je tada opterećenje kotača:

$$Q_k = N_B \cos \beta + N_B \mu_v \sin \beta,$$

a sila vođenja vanjskog kotača prvog osovinskog sklopa:

$$F_Y = N_B \sin \beta + N_B \mu_v \cos \beta$$

gdje je N_B normalna komponenta opterećenja u točki B, $\mu_v (= \tan \rho)$ koeficijent trenja između vijenca kotača i boka glave tračnice, a β kut nagiba vijenca kotača. U trenutku ravnoteže bit će:

$$\frac{F_Y}{Q_k} = \frac{\tan \beta - \tan \rho}{1 + \tan \beta \cdot \tan \rho} = \tan(\beta - \rho)$$

gdje je ρ kut trenja. Uz uobičajene iznose veličina ($\beta = 70^\circ$, $\tan \rho = \mu_v \approx 0,36$) prethodni brojčani izraz dobiva vrijednost:

$$\frac{F_Y}{Q_k} \leq 0,8$$

što je granična vrijednost omjera mehaničkih sila pred iskliznuće. Za sigurnu vožnju u današnje vrijeme taj omjer mora prema UIC-u biti manji od 0,8.

Iznosi sila kojima vozilo opterećuje kolosijek mjera su kvalitete vožnje. Najveća dopuštena bočna sila vozila na kolosijek s obzirom na moguća oštećenja tračnica i pričvrstnog pribora, iznosi prema Prud'hommeu:

$$F_p = \alpha \left(10 + \frac{Q_o}{3} \right) \quad [\text{kN}]$$

Izraz za osovinsko opterećenje:

$$Q_o = \frac{m_l \cdot g}{k} \quad [\text{N}]$$

$k = 4$ - broj pogonskih osovina vagona

$$Q_o = \frac{48000 \cdot 10}{4}$$

$$Q_o = 120000 \text{ N}$$

$$F_p = \alpha \left(10 + \frac{Q_o}{3} \right) \quad [\text{kN}]$$

$$F_p = 0,85 \left(10 + \frac{Q_o}{3} \right) = 0,85 \left(10 + \frac{120}{3} \right) = 42,5$$

$$F_p = 42,5 \text{ kN}$$

3.2. Najveća brzina u luku

Najveća bočna sila određuje se prema metodi Heumanna. Ova metoda je grafoanalitička i zasniva se na ideji da vozilo u zavoju zauzme onaj položaj za koji je sila skretanja minimalna.

Najveća brzina u najmanjem luku kolosijeka:

$$v_{R \max} = 4,87 \cdot \sqrt{R} \quad [\text{km/h}]$$

$$v_{R \max} = 4,87 \cdot \sqrt{300}$$

$$v_{R \max} = 84,3 \text{ km/h}$$

3.3. Sile na kolosijek

Za pretpostavljenu brzinu od $v = 65 \text{ km/h}$ određuje se sila prema metodi Heumanna.

Centripetalna sila za $v = 65 \text{ km/h} = 18 \text{ m/s}$:

$$F_C = \frac{m_l}{2} \cdot \left(\frac{v^2}{R} + a_{\text{nep}} \right) \quad [\text{kN}]$$

$$F_C = \frac{48}{2} \cdot \left(\frac{18^2}{300} + 1 \right)$$

$$F_C = 50 \text{ kN}$$

U crtež unosimo momentnu liniju sile na uzdužnu os lokomotive F_C . Kako bi se to učinilo moramo odrediti moment sile F_C :

$$M_{Fc} = F_C \cdot \frac{l_{RO}}{2} \quad [\text{kNmm}]$$

$$l_{RO} = 2500 \text{ mm} \quad - \text{razmak osovina}$$

$$M_{Fc} = 50 \cdot \frac{2500}{2}$$

$$M_{Fc} = 62500 \text{ kNmm}$$

U crtež se sve veličine unose u $2\mu Q_k$ jedinicama pa postojeći moment moramo podijeliti sa $2\mu Q_k$:

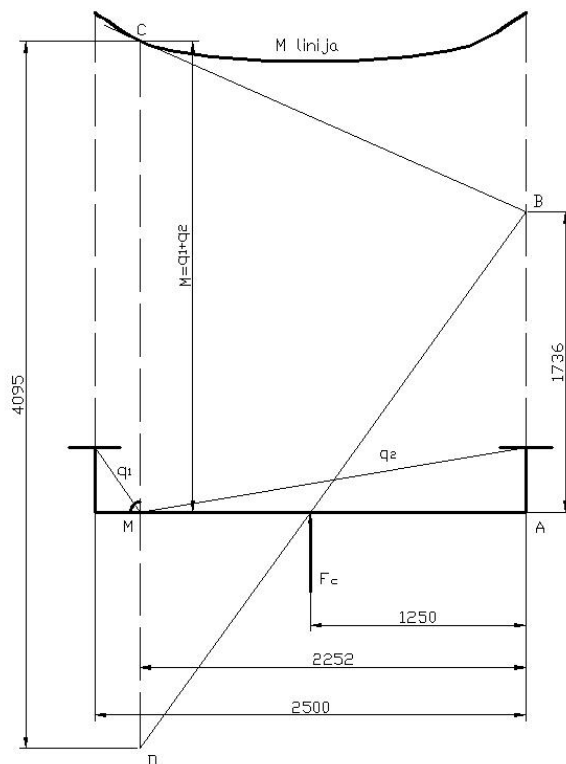
$$M_{Fc} / 2\mu Q_k$$

$$Q_k = \frac{Q_o}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ kN}$$

$$\mu = 0,3$$

$$M_{Fc} / 2\mu Q_k = 62500 / 2 \cdot 0,3 \cdot 60 = 1736 \text{ mm}$$

Da bi se odredila sila skretanja prema Heumannu potrebno je odrediti omjer dužina \overline{CD} i \overline{MA} .



Sila skretanja prema Heumannu:

$$F_H = \frac{\overline{\text{CD}}}{\overline{\text{MA}}} \cdot 2\mu Q_k \quad [\text{kN}]$$

$$\overline{CD} = 4095 \text{ mm}$$

$$\overline{MA} = 2252 \text{ mm}$$

$$F_H = \frac{4095}{2252} \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot 60$$

$$F_H = 66 \text{ kN}$$

Sila na kolosijek:

$$F_k = F_H - \mu Q_o \quad [\text{kN}]$$

$$F_k = 66 - 0,3 \cdot 120$$

$$F_k = 30 \text{ kN}$$

$$F_k = 30 \text{ kN} < F_p = 42,5 \text{ kN}$$

Uvjet je zadovoljen.

3.4. Provjera sigurnosti od iskliznuća

Sila vođenja:

$$F_Y = F_H - \mu Q_k \quad [\text{kN}]$$

$$F_Y = 66 - 0,3 \cdot 60$$

$$F_Y = 48 \text{ kN}$$

Omjer sile vođenja i opterećenja na kotaču:

$$\frac{F_Y}{Q_k} \leq \frac{48}{60} = 0,80$$

Uvjet je ispunjen, no kako je pri brzini od 65 km/h faktor iskliznuća približno jednak dopuštenoj vrijednosti zaključak je da brzina pri prolasku kroz luk radijusa 300 m mora biti manja od 65 km/h.

4. Zaključak

Provedeni proračun pokazao je da vagon svojim performansama i sposobnostima vrlo dobro ispunjava sve postavljene zahtjeve.

Na temelju proračuna može se zaključiti kako putnički vagon svojim vanjskim izmjerama odgovara svim postojećim dogovorima i normama prema UIC-u.

Tijekom proračuna sila i određivanja sigurnosti od iskliznuća dokazano je da optimalna brzina kojom je moguće proći najmanji predviđeni luk od 300 m mora biti manja od 65 km/h kako bi vlak bez opasnosti od iskliznuća i oštećenja kolosijeka mogao proći kroz takav luk.

U prilogu proračuna nalazi se nacrt i tlocrt vagona . Crteži prikazuju putnički vagon Gredelj At te njegovu unutrašnjost. Vagon izrađen je u tri osnovna dijela, dva ulaza sa hodnikom i sanitarijama i glavni dio putnički prostor koji je otvorenog salonskog tipa sa vizualnom staklenom pregradom koja dijeli prostor pušača (18 sjedala) od nepušača (36 sjedala). Za veću udobnost putnika vagon je klimatiziran, posjeduje utičnice za napajanje prijenosnih računala i mobilnih telefona, vrata sa automatskim upravljanjima, vakuum WC-ima, ergonomskim sjedalima na izvlačenje, preklopnim stoličima za mogućnost rada na prijenosnom računalu..

5. Literatura

- [1] Serdar, J.: Lokomotive, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb 1997.
- [2] Dujmović, N.: Konceptija vuče u sklopu projektiranja suvremenih brzih željezničkih prometnica, Građevinar 32, 7-17, 1980.
- [3] Dujmović, N.: Istraživanja vezana za proračun snage za vuču vlakova velikih brzina, Suvremeni promet 5, 382-387, God. 27 (2007)
- [4] Dujmović, N.: Željeznica (Vučna vozila, mehanika kotač/tračnica) Tehnička enciklopedija, XIII, 659-666, Hrvatski leksikografski zavod, Zagreb 1997.

PRILOG: Tlocrt putničkog vagona za IC promet

U prilogu je moguće vidjeti raspored i unutarnju arhitekturu vagona za komfor prvog razreda.

